

大作业报告

袁晨圃，李知谦，邱子陶

完整代码: <https://github.com/cauphenuny/data-structure-assignment>

一、实习 6.4 平衡树操作演示

1.1 CLI

```
$ build/balanced_tree
commands:
  [q]uit
  [h]elp

  [c]reate <tree-id: a-z|A-Z> <algo: basic|avl|treap|splay>
  [d]elete <tree-id: a-z|A-Z>
  [p]rint <tree-id: a-z|A-Z>*

  [i]nsert <tree-id: a-z|A-Z> <key: int> <value: int>
  [r]emove <tree-id: a-z|A-Z> <key: int>
  [f]ind <tree-id: a-z|A-Z> <key: int>

  [s]plit <dest-id: a-z|A-Z> <src-id: a-z|A-Z> <key: int>
  [m]erge <dest-id: a-z|A-Z> <src-id: a-z|A-Z>

  [R]andom-insert <tree-id: a-z|A-Z> <count: int>
  [S]equential-insert <tree-id: a-z|A-Z> <start: int> <end: int>

trace mode:
  [n] or [\n]: next
  [c]: auto continue
>>>
```

提供了一个功能强大的解释器环境

支持创建/删除/输出树，在树中插入节点，删除节点，查找节点，分割树，合并树。

树名为单个字母 (a-z, A-Z)，可以使用任意算法 (basic: 普通 BST, avl: AVLTree, treap: Treap, splay: Splay) 创建树

支持随机插入和顺序插入若干个节点。

在每一个操作之后都会打印单步结果 (trace)，对树结构的任何操作（例如：连接或者断开连接子树）都会被实时记录下来。

显示 trace 时支持自动继续 (c) 和单步执行 (n)。

—

使用示例：

- 插入/删除/查找

```
>>> c A avl # create an AVLTree A
Created tree A with algorithm avl
>>> i A 1 10 # insert key-value 1-10 to tree A
Inserted {1: 10} into tree A
-----
Trace of tree A:
#1:
    {3: 30}
    {2: 20}
```

```

#1:                                     {1: 10}
{1: 10}                               -----
>>> f A 1                             (trace) c
Found {1: 10} in tree A               #2:
>>> i A 2 20                         {1: 10}
Inserted {2: 20} into tree A         ----
-----                               {3: 30}
Trace of tree A:                     {2: 20}
#1:                                  -----
    {2: 20}
{1: 10}
-----
#3:                                  {3: 30}
    {3: 30}
{2: 20}
    {1: 10}

-----
>>> S A 4 12
Inserted sequential elements from 4 to 12 into tree A
...
>>> r A 6
Removed 6 from tree A

-----
Trace of tree A:
#1:
    {11: 92}
    {10: 25}
    {9: 100}
    {8: 28}
    {7: 84}
    {6: 71}
{4: 85}
    {3: 30}
    {2: 20}
    {1: 10}
-----
{5: 5}
-----
(trace) c

-----
#3:
    {11: 92}
    {10: 25}
    {9: 100}
    {8: 28}
    {6: 71}
{4: 85}
    {3: 30}
    {2: 20}
    {1: 10}
-----
    {7: 84}
{5: 5}
-----

#4:
    {11: 92}
    {10: 25}
    {9: 100}
    {8: 28}
    {4: 85}
    {3: 30}
    {2: 20}
    {1: 10}
-----
    {7: 84}
{5: 5}
-----
{6: 71}
-----

```

```

#5:
    {11: 92}
    {10: 25}
    {9: 100}
    {8: 28}
{4: 85}
    {3: 30}
    {2: 20}
    {1: 10}
----
    {7: 84}
{5: 5}
-----

#6:
    {11: 92}
    {10: 25}
    {9: 100}
    {8: 28}
    {7: 84}
    {5: 5}
    {4: 85}
    {3: 30}
    {2: 20}
    {1: 10}
>>>

```

- 分裂: 在 $O(\log n)$ 时间内分裂出 $\geq \text{key}$ 的所有节点到一颗新树

```
>>> S A 10 20 # insert [10, 20) to tree A
```

```

...
>>> p
Tree A: AVLTree:
    {19: 116}
    {18: 139}
    {17: 173}
    {16: 187}
    {15: 159}
    {14: 143}
    {13: 169}
    {12: 160}
    {11: 195}
    {10: 124}
    {3: 30}
    {2: 20}
    {1: 10}

```

```
>>> s B A 15 # split tree A at key 15, result in tree B
```

```

...
>>> p
Tree A: AVLTree:
    {14: 143}
    {13: 169}
    {12: 160}
    {11: 195}
    {10: 124}
    {3: 30}
    {2: 20}
    {1: 10}
Tree B: AVLTree:
    {19: 116}
    {18: 139}
    {17: 173}
    {16: 187}
    {15: 159}

```

使用相同的命令管理不同算法的树

```

>>> c A avl
Created tree A with algorithm avl
>>> c T treap
Created tree T with algorithm treap
>>> c S splay
Created tree S with algorithm splay
>>> S A 1 10 # insert [1, 10) to tree A
...
>>> S T 1 10 # insert [1, 10) to tree T
...
>>> S S 1 10 # insert [1, 10) to tree S
...
>>> p ATS
Tree A: AVLTree:
    {9: 91}
    {8: 15}
    {7: 44}
    {6: 76}
    {5: 30}
    {4: 26}
    {3: 28}
    {2: 97}
    {1: 13}
Tree T: Treap:
    {9: 33}
    {8: 98}
    {7: 51}
    {6: 94}
    {5: 67}
    {4: 94}
    {3: 98}
    {2: 21}
    {1: 61}
Tree S: SplayTree:
    {9: 14}
    {8: 27}
    {7: 92}
    {6: 47}
    {5: 60}
    {4: 13}
    {3: 24}
    {2: 62}
    {1: 54}
>>>

```

1.2 算法

语言: C++

使用 template 实现对于 Key, Value 的泛型支持

使用 CRTP & Mixin 实现代码复用

最大程度上复用代码的同时实现了多种平衡算法: BasicTree, AVLTree, Treap, SplayTree

三层类结构, 逐级擦除类型信息

TreeAdapter<K, V, Impl> : Tree<K, V> : TreeBase

使用 TreeBase 时不需要关心内部的 key, value 是什么类型

使用 `Tree<K, V>` 时不需要关心内部用的什么算法实现平衡树

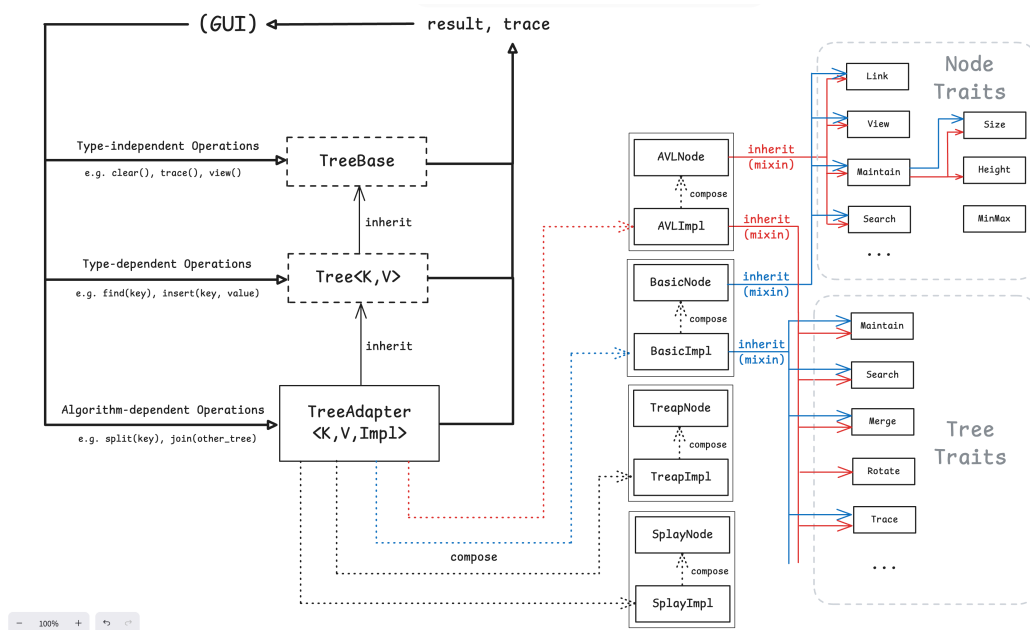


图 1 Tree 类图

1.2.1 基础操作实现

例: 实现 `find (trait::node::Search, trait::Search)`

```
template <typename Node> struct Search {
    auto find(auto&& key) {
        // ...
    }
};

template <typename Tree> struct Search {
    auto find(auto&& key) {
        auto&& root = static_cast<const Tree*>(this)->root;
        return root ? root->find(key) : nullptr;
    }
};

struct BasicTreeImpl : Search<BasicTreeImpl>;
struct AVLTreeImpl : Search<AVLTreeImpl>;
struct TreapImpl : Search<TreapImpl>;
```

例: 实现可提供不同功能的 `maintain()` (`trait::node::Maintain`)

```
template <typename Node> struct Height {
    int height{1};
    void maintain() {
        auto& self = *(static_cast<Node*>(this));
        auto l = self.child[L] ? self.child[L]->height : 0;
        auto r = self.child[R] ? self.child[R]->height : 0;
        self.height = 1 + std::max(l, r);
    }
};

template <typename Node> struct Size {
```

```

size_t size{1};
void maintain() {
    auto& self = *(static_cast<Node*>(this));
    auto l = self.child[L] ? self.child[L]->size : 0;
    auto r = self.child[R] ? self.child[R]->size : 0;
    self.size = 1 + l + r;
}
};
—

// helper trait to maintain multiple properties
template <typename... Ts> struct Maintain : Ts... {
    void maintain() { (Ts::maintain(), ...); }
};

// imports a maintain() that maintains size
struct BasicNode : Maintain<Size<BasicNode>>;
// imports a maintain() that maintains both size and height
struct AVLNode : Maintain<Size<AVLNode>, Height<AVLNode>>;
—

```

1.2.2 旋轉實現 (trait::Rotate)

```

template <typename Tree> struct Rotate {
    void rotate(int dir, auto& root) {
        auto& self = *static_cast<Tree*>(this);
        auto new_root = self.unbind(root, dir ^ 1);
        if (new_root->child[dir]) {
            self.bind(root, dir ^ 1, self.unbind(new_root, dir));
        }
        auto parent = root->parent;
        self.bind(new_root, dir, std::move(root));
        self.moveNode(root, std::move(new_root), parent);
        root->child[dir]->maintain();
        root->maintain();
    }
    void rotatEL(auto& root) { return rotate(L, root); }
    void rotateR(auto& root) { return rotate(R, root); }
    void rotatELR(auto& root) {
        rotateL(root->child[L]), rotateR(root);
    }
    void rotateRL(auto& root) {
        rotateR(root->child[R]), rotateL(root);
    }
};
—

```

1.2.3 AVL 樹的 split 和 join (AVLTree::{join, split})

- 先實現 join(left_tree, separator_node, right_tree): 給定 key 值不交的两棵 AVL 樹和一個 key 值在兩樹之間的分界點節點, 合併成一棵樹

考慮 $\text{height}_{\text{left}} \geq \text{height}_{\text{right}}$ 的情況, 反之對稱

在左樹中找到高度為 h_{right} 或 $h_{\text{right}} + 1$ 的點 cut_tree, 由於左樹是 AVL 樹, 一定能找到

將 cut_tree 和 right_tree 掛到 separator_node 上, 然後放回原先的位置

高度最多改变 1, 从 `cut_tree` 位置向上维护平衡即可。

时间复杂度: $O(|h_{\text{left}} - h_{\text{right}}|)$

- `join(left_tree, right_tree):`

删除 `left_tree.max()` 或 `right_tree.min()`, 转换为带 separator 的 join

- `split(tree, key)`

如右图所示, 在 `find(key)` 的路径上的位置将节点和它的左右子树分开

然后自底向上合并, 每一次合并用路径中的点 (图中的 P_i) 作为 separator 合并两子树

$$\begin{aligned}\alpha P &\leftarrow \text{join}(\alpha, P) \\ \beta P_8 \beta_8 &\leftarrow \text{join}(\beta, P_8, \beta_8) \\ \alpha_7 P_7 \alpha P &\leftarrow \text{join}(\alpha_7, P_7, \alpha P) \\ \dots &\leftarrow \dots\end{aligned}$$

每一次合并的复杂度是高度差, 高度差之和不超过总高度, 所以复杂度为 $O(\log n)$

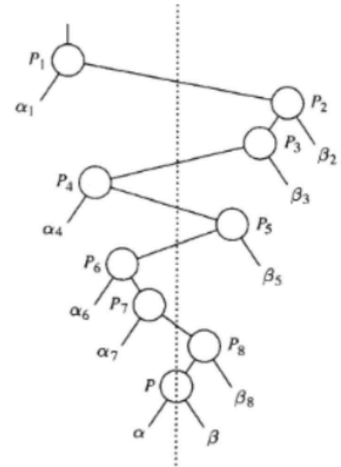


图 2 split 演示. ref.TAOCP

1.3 实现细节

- 基类接口, 提供类型无关的方法:

```
struct TreeBase {
    virtual ~TreeBase() = default;
    virtual auto size() const -> size_t = 0;
    virtual void clear() = 0;
    virtual auto view() const -> ForestView = 0;
    virtual auto trace() -> std::vector<ForestView> = 0;
    virtual auto trace(const std::function<void()>& func) -> std::vector<ForestView> = 0;
    virtual void traceStart() = 0;
    virtual void traceStop() = 0;
    virtual void printCLI() const = 0;
    virtual auto stringify() const -> std::string = 0;
    virtual auto name() const -> std::string = 0;
};
```

- 在 `TreeBase` 的基础上定义 `Tree` 接口, 提供需要 `key, value` 类型信息的方法

```
template <typename K, typename V> struct Tree : TreeBase {
    virtual auto find(const K& key) -> Pair<const K, V*> = 0;
    virtual auto findKth(size_t rank) -> Pair<const K, V*> = 0;
    virtual auto min() -> Pair<const K, V*> = 0;
    virtual auto max() -> Pair<const K, V*> = 0;
    virtual auto insert(const K& key, const V& value) -> Status = 0;
    virtual auto remove(const K& key) -> Status = 0;
    virtual void traverse(const std::function<void(const K&, V&)>& func) = 0;
    virtual auto operator[] (const K& key) -> V& = 0;
    virtual auto operator[] (const K& key) const -> const V& = 0;
};
```

- 通过 TreeAdapter 绑定具体实现到 Tree 接口上

```
template <typename K, typename V, template <typename, typename> typename Impl>
struct TreeAdapter : Tree<K, V> {
    friend struct Test;
    auto size() const -> size_t override { return impl->size(); }
    auto view() const -> ForestView override { return impl->view(); }
    ...
    std::unique_ptr<Impl<K, V>> impl;
};
```

将算法通过模版参数传入 TreeAdapter, 进而能统一使用 Tree 接口控制不同类型的树

```
template <typename K, typename V>
using BasicTree = TreeAdapter<K, V, BasicTreeImpl>;
template <typename K, typename V>
using AVLTree = TreeAdapter<K, V, AVLTreeImpl>;
template <typename K, typename V>
using SplayTree = TreeAdapter<K, V, SplayTreeImpl>;
template <typename K, typename V>
using Treap = TreeAdapter<K, V, TreapImpl>;
```

- 每一种 Tree 都从 trait:: 中选取使用的特性继承, 比如: AVL/Splay 使用旋转特性

AVLNode 需要维护 Height, 而普通 Node 不需要,

所以分别继承 Maintain<Size<AVLNode>, Height<AVLNode>> 和 Maintain<Size<Node>>

```
template <typename K, typename V>
struct AVLNode
    : Pair<const K, V>,
      trait::node::TypeTraits<K, V>,
      trait::node::Link<AVLNode<K, V>>,
      trait::node::View<AVLNode<K, V>>,
      trait::node::Maintain<trait::node::Size<AVLNode<K, V>>, trait::node::Height<AVLNode<K,
V>>>,
      trait::node::Search<AVLNode<K, V>> {

    AVLNode(const K& k, const V& v, AVLNode* parent = nullptr)
        : Pair<const K, V>(k, v), trait::node::Link<AVLNode<K, V>>(parent) {
        this->maintain();
    }
};
```

- 通过 Mixin 结合不同功能, 写一个 Mixin 辅助模版类减少 CRTP 重复的派生类声明

```
/// @struct Mixin
/// @brief simply mixin multiple traits into a single type, Mixin<T, A, B> serves as A<T>, B<T>
template <typename Type, template <typename> class... Traits> struct Mixin : Traits<Type>...
{};

template <typename K, typename V>
struct AVLTreeImpl
    : trait::Mixin<AVLNode<K, V>, trait::TypeTraits, trait::Maintain>,
      trait::Mixin<
        AVLTreeImpl<K, V>, trait::InsertRemove, trait::Search, trait::Clear,
        trait::Size, trait::Height, trait::Print, trait::Traverse, trait::Merge,
        trait::Subscript, trait::Conflict, trait::Box, trait::Detach, trait::View,
```



```

    trait::Trace, trait::TracedBind, trait::TracedConstruct, trait::Rotate,
    trait::Iterate> {
    // ...
};

```

1.3.1 内存管理

使用 `std::unique_ptr` 管理节点所有权, 防止内存泄露或者 double free 问题

```

template <typename Node> struct Link {
    Node* parent{nullptr};
    std::unique_ptr<Node> child[2]{nullptr, nullptr};
    Link(Node* parent = nullptr) : parent(parent) {}
};

```

1.3.2 Trace 记录 (trait::Trace)

- 在结构体中放一个 `std::vector<ForestView>` record; 记录每一步操作之后的状态

所有对树结构的操作都通过调用 `bind()`, `unbind()` 方法, 内部自动维护以及记录 trace

- 记录 trace 的方法:

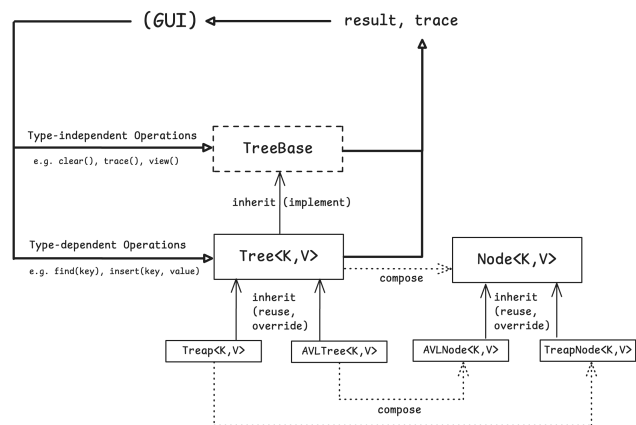
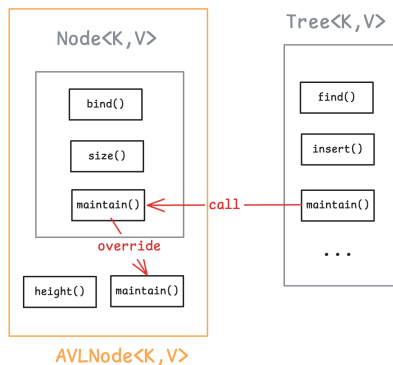
维护当前森林的根节点列表 `std::set<Node*>` entries;

每作一次记录 `snapshot()` 就复制出 entries 对应每一颗树中的信息, 保存至 record

1.3.3 性能优化

最开始的结构:

- 非常容易想到



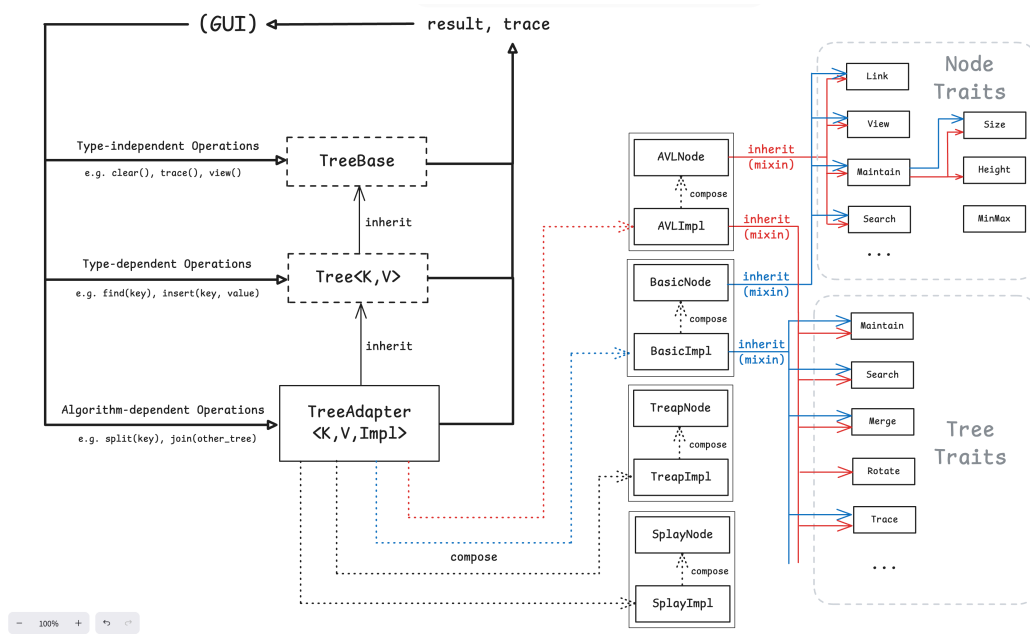
但

- 以 `maintain()` 为例, 每一次自底向上维护信息时, 都需要调用 `node::maintain()`, 然而这是一个虚函数, 但没法内联, 每一次调用都有额外开销
- `Tree` 中只会存一个基类的 `Node` 指针, 每一次使用子类 `Node` 特有信息时都需要 `static_cast` 或者 `dynamic_cast`
- 拓展功能比较麻烦
 - Splay 和 AVL 都可以旋转, 要么实现两遍, 要么创建一个 `RotatableTree`, 增加继承层级
 - 更好的想法应该是把 `Rotate` 抽出来作为一个只提供旋转功能的 trait

- 既然如此, 为什么不把所有的功能都抽出来?

重构!

- 所有树平级, 复用的功能只由 trait 提供
- 由于不同的树之间没有子类型关系, 需要一个 TreeAdapter 来绑定到相同的接口上



查看是否内联:

- 重构前

```
$ nm | c++filt
000000010001e7c8 legacy::AVLTree<int, int>::AVLNode::maintain()
000000010001c4ec legacy::Tree<int, int>::Node::maintain()
```

只有 Tree::maintain() 被内联了, Node 本身的 maintain() 没有被内联

- 重构后:

```
$ nm | c++filt
0000000100020578 AVLNode<int, int>::stringify() const
000000010001fe4c AVLNode<int, int>::~~AVLNode()
```

Tree	Insert	Find	Remove
legacy::AVLTree(ms)	48.40	11.65	49.86
AVLTree(ms)	32.35	10.21	41.70
std::map(ms)	25.09	11.58	30.74
CRTP Improvement(%)	33.15	12.32	16.35

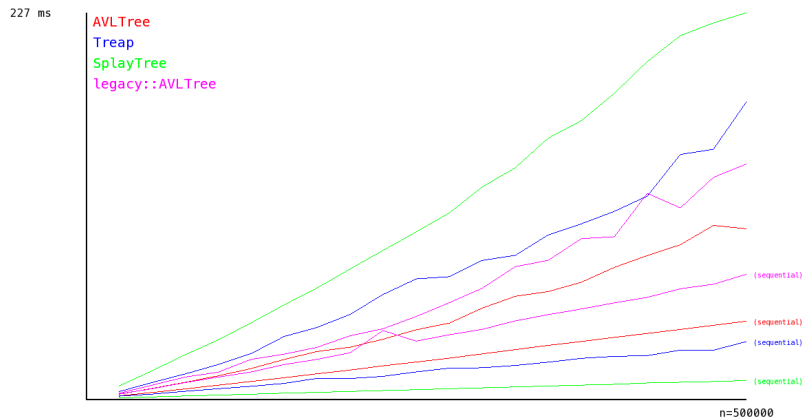


图 6 benchmark: insert

可以看到重构后提升还是很显著的

完整代码: <https://github.com/cauphenuny/data-structure-assignment>

1.4 单元测试

整个项目十分复杂, 因此为每个功能写了测试

使用 doctest 库进行单元测试

```
$ build/balanced_tree test
[doctest] doctest version is "2.4.12"
[doctest] run with "--help" for options
=====
[doctest] test cases: 26 | 26 passed | 0 failed | 0 skipped
[doctest] assertions: 6854 | 6854 passed | 0 failed |
[doctest] Status: SUCCESS!
```

测试举例

```
SUBCASE("Split and merge") {
    // Split at 50
    auto other = tree->split(50);
    CHECK(other != nullptr);
    CHECK(tree->size() + other->size() == 7);

    Test::check(tree);
    Test::check(other);

    // Verify split worked correctly
    CHECK(tree->find(30) != nullptr);
    CHECK(tree->find(20) != nullptr);
    CHECK(tree->find(40) != nullptr);
    CHECK(tree->find(50) == nullptr);
    CHECK(tree->find(70) == nullptr);

    CHECK(other->find(50) != nullptr);
    CHECK(other->find(70) != nullptr);
    CHECK(other->find(60) != nullptr);
    CHECK(other->find(80) != nullptr);

    // Merge back
    tree->merge(std::move(other));
}
```

```

CHECK(tree->size() == 7);
CHECK(tree->find(50) != nullptr);
CHECK(tree->find(70) != nullptr);
CHECK(tree->find(60) != nullptr);
CHECK(tree->find(80) != nullptr);

Test::check(tree);
}

```

二、实习 2.4 马踏棋盘问题演示

2.1 算法

2.1.1 暴力搜索算法

暴力算法实现 `solve_brute_force(Point start)`:

通过手动维护一个栈记录走过的路径结点坐标与正在尝试的方向，当无路可走时利用栈进行回溯从而尝试新的路径。

```

class SimpleStack {
private:
    T* base;
    int top;
    int capacity; // 当前容量

    void expand() { ... }
public:
    SimpleStack(int initial_capacity = 100) : base(nullptr), top(-1),
capacity(initial_capacity) { ... } // 构造
    ~SimpleStack() { ... } // 销毁
    void push(const T& value) { ... } // 入栈
    void pop() { ... } // 出栈
    T& peek() { ... } // 读栈顶
    bool empty() const { ... } // 判断是否栈空
    int size() const { ... } // 返回栈元素个数
}

struct Node {
    Point pos; // 当前坐标
    int move_index; // 当前正在尝试的方向
};

```

为了可视化搜索的过程，我们决定记录过程中每一步试探（包括回溯）。

最开始算法中每步都存储完整的棋盘（二维数组），但每步都存储一个棋盘带来的内存占用过大。

后来我们决定只使用起始点与终止点的坐标对记录每一步的行动，通过 `stepNext` 标签记录该步是前进还是回溯。

```

struct Arrow {
    Point start, end;
    bool stepNext; // 前进为1，后退为0
};

void Print_board(Board);

using Path = std::vector<Arrow>; // 一条可行路径

// 算法返回值：
return std::vector<Path> // 允许返回多条可行路径

```

但即便如此，暴力搜索算法的大量路径试探仍会带来无法承受的内存开销。

2.1.2 贪心算法

贪心算法实现 `solve_heuristic(Point start)`:

基于 H. C. von Warnsdorf 于 1823 提出的 Warnsdorf's Rule —— 每步选择可移动方向最少得位置移动。该算法可以以极快的速度给出一个可行解。

通过 `count_onward_moves()` 计算落点的可走步数:

```
static int count_onward_moves(const Board& board, int x, int y) {
    int count = 0;
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        int nx = x + dx[i];
        int ny = y + dy[i];
        if (nx >= 0 && nx < BOARD_SIZE && ny >= 0 && ny < BOARD_SIZE && board(nx, ny) ==
0) {
            ++count;
        }
    }
    return count;
}
```

在 `solve_heuristic(Point start)` 内部对每一步的 `MoveOption` 数组排序, 并向最小的方向进发。

```
// 枚举所有下一步的可选走法
for (int i = 0; i < 8; ++i) {
    int nx = x + dx[i];
    int ny = y + dy[i];
    if (nx >= 0 && nx < BOARD_SIZE && ny >= 0 && ny < BOARD_SIZE && board(nx, ny) == 0) {
        int onward = count_onward_moves(board, nx, ny);
        options.push_back({nx, ny, onward});
    }
}
// 按后继步数升序排序
std::sort(options.begin(), options.end(), [](const MoveOption& a, const MoveOption& b) {
    return a.onward < b.onward;
});
```

但贪心算法只能得到一个可行解。我们希望算法可以找到多条可行解 (具有找到全部可行解的潜力)。

2.1.3 基于 Warnsdorf's Rule 的深度搜索算法

算法实现 `solve_heuristic_enhancer(Point start)`:

首次到达某结点时, 基于 Warnsdorf's Rule 对其可行方向排序, 优先选择出路最少的方向从而减少回溯次数。

由于框架仍是深度优先搜索, 如果想找到多条可行路径, 只需在找到一条可行路径后继续回溯即可。

```
while (!stk.empty()) {
    if (step == BOARD_SIZE * BOARD_SIZE) {
        if (!stk.empty()) {...} // 保存最后一步结果
        if (countHistory == NUM_OF_PATH) break;
    } else { // 后退一步继续搜其他路径
        Point end = stk.peek().pos;
        stk.pop(); --step; board(end.x, end.y) = 0;
        Point start = stk.empty() ? end : stk.peek().pos;
    }
}
```

2.2 GUI



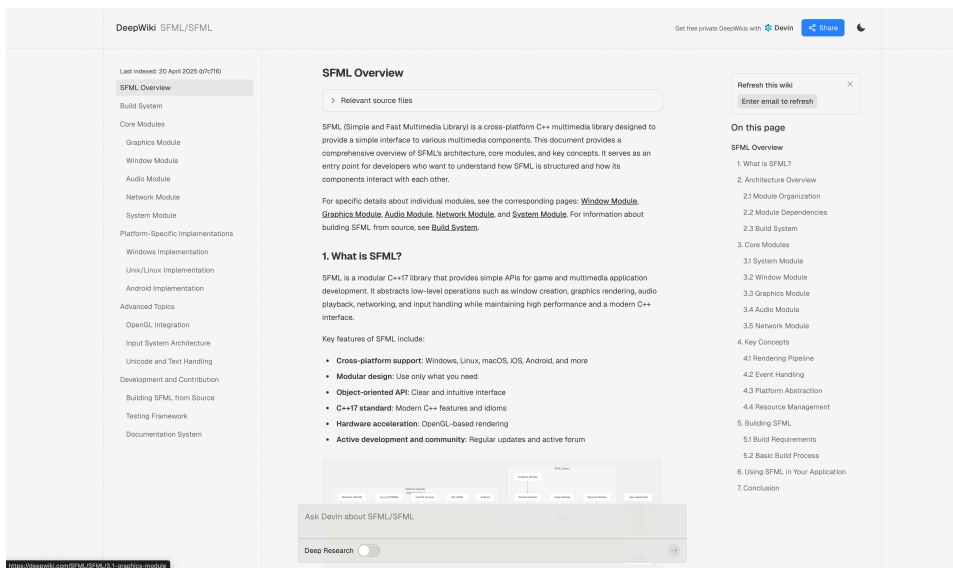


图 8 deepwiki

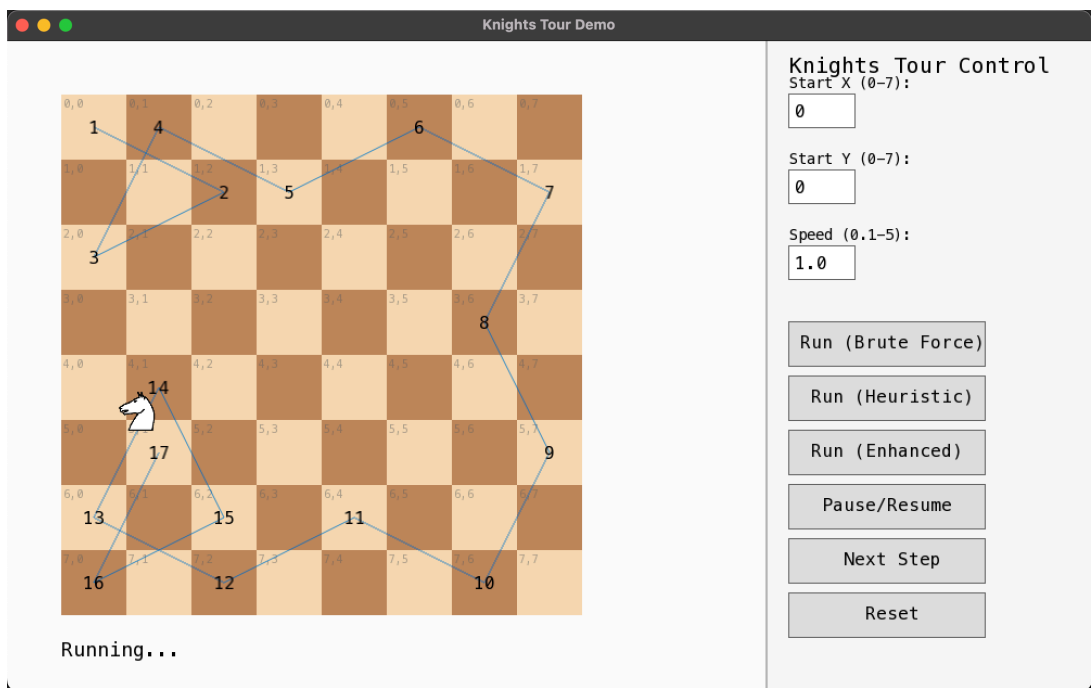


图 9 GUI 演示